

3. Цанев С.В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: учебное пособие для вузов / С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов; под ред. С.В. Цанева. 2-е изд., стереот. М.: Издательский дом МЭИ, 2006.

## РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПОТЕРЬ ЧЕРЕЗ СВЕТОПРОЗРАЧНЫЕ ОГРАЖДЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ТЕХНИКИ

*Горелов М.В., Яковлев И.В., Глазов В.С.  
Московский энергетический институт  
gorelov\_mikhail@mail.ru*

Тепловой неразрушающий контроль (тепловизионный метод), который сейчас широко применяется при энергетических обследованиях, позволяет оперативно получить термограммы наружных ограждающих конструкций. Однако существующие нормативные документы и методики проведения таких обследований распространяются только на несветопрозрачные ограждения. Метод тепловизионного контроля используется только для качественного анализа состояния тепловой защиты наружных ограждений. Поэтому разработка метода, который позволит оперативно количественно определить тепловые потери через светопрозрачное ограждение, является актуальной и важной задачей.

Расчетно-экспериментальный метод условно можно разделить на два этапа: 1) экспериментальные исследования (тепловизионная съемка светопрозрачного ограждения); 2) определение количественных значений плотности тепловых потоков по математическим моделям «светопрозрачное ограждение – внешняя среда» или «многослойная конструкция».

Объектами исследований были однокамерный стеклопакет в ПВХ переплете и двойное остекление в деревоалюминиевом переплете. Экспериментальные исследования состояли из двух этапов: контактные измерения температуры в заранее определенных точках наружной и внутренней поверхностей ограждающей конструкции, в том числе и светопрозрачной, плотности теплового потока на внутренней поверхности светопрозрачного ограждения; тепловизионная съемка наружной и внутренней поверхностей ограждения.

Математическая модель теплообмена в системе «светопрозрачное ограждение – внешняя среда» позволяет осуществить отдельный учет лучистого и конвективного потоков.

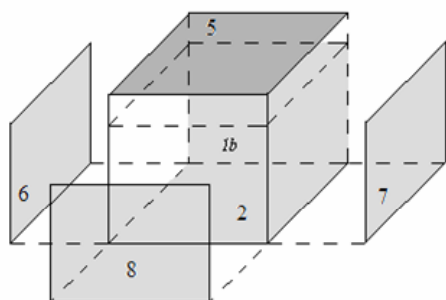


Рис. 1. Геометрическая модель системы «светопрозрачное ограждение – внешняя среда»

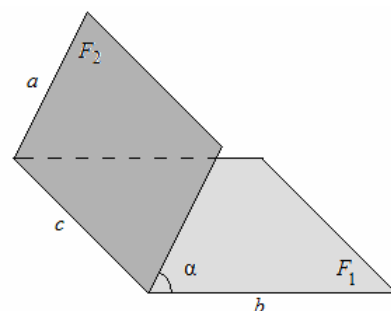


Рис. 2. Два прямоугольника, расположенные под углом друг к другу

На рис. 1 представлена геометрическая модель системы «светопрозрачное ограждение – внешняя среда», на базе которой исследуется теплообмен излучением.

Лучистая составляющая потока рассчитывалась по формуле:

$$q_{\Sigma} = \sigma_o \cdot \varepsilon_{np} \cdot \varphi_{12} \cdot \left[ (273 + t_1)^4 - (273 + t_2)^4 \right]. \quad (1)$$

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) \cdot \varphi_{12} + \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \cdot \varphi_{21}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана–Больцмана;  $\varepsilon_{np}$  – приведенная степень черноты;  $t$  – температура излучающей или поглощающей поверхности, °С;

В основу расчета средних угловых коэффициентов положена формула, которая позволяет определить искомую величину для системы двух прямоугольников, образующих угол в 90 градусов и имеющих общую сторону (рис. 2):

$$\varphi_{12} = \begin{cases} \frac{B}{A}, \text{ если } \alpha = 0 \text{ и } A > B; & 1, \text{ если } \alpha = 0 \text{ и } A \leq B; & 0, \text{ если } \alpha = 180, \\ \frac{1}{\pi A} \left\{ \begin{aligned} & A \cdot \arctg(1/A) + B \cdot \arctg(1/B) - Z \cdot \arctg(1/Z) + 0,25 \cdot \\ & \ln \left[ \frac{(1 + A^2) \cdot (1 + B^2)}{1 + Z^2} \cdot \left[ \frac{A^2(1 + Z^2)}{Z^2(1 + A^2)} \right]^{A^2} \cdot \left[ \frac{B^2(1 + Z^2)}{Z^2(1 + B^2)} \right]^{B^2} \right] \end{aligned} \right\}, \text{ если } \alpha = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (3)$$

где  $A = a/c$ ;  $B = b/c$ ;  $Z = \sqrt{A^2 + B^2}$

Для описания конвективного теплообмена между светопрозрачным ограждением и внешней средой использована система дифференциальных уравнений конвективного переноса (в том числе естественного), включая уравнения неразрывности, сохранения импульса, сохранения энергии, кинетической энергии турбулентных пульсаций и диссипации турбулентной энергии.

Для решения задачи в данной постановке использовался программный комплекс *PHOENICS*. Данный программный продукт позволяет производить расчеты локальных значений и направлений скорости воздушных потоков, коэффициентов теплоотдачи, полей температур, давлений и т.д. Алгоритм основан на аппроксимации частных дифференциальных уравнений в частных производных конечными разностями на элементарном объеме. При проведении расчетов использовалась стандартная  $k$ – $\varepsilon$  модель турбулентности. Для нахождения значения коэффициента теплоотдачи и величины конвективного теплового потока использовался алгоритм, приведенный в [1].

Математическая модель «многослойная конструкция» позволяет рассчитывать одномерное стационарное температурное поле и поток теплоты, проходящий через модель стеклопакета при заданных (измеренных) температурах его поверхностей и внешних источников излучения.

Математические зависимости, которые описывают процесс теплопереноса в многослойной конструкции:

$$\frac{d^2}{dx^2} t_i(x) + \frac{q_{inLi} \cdot k_i \cdot e^{-k_i x} + q_{inRi} \cdot k_i \cdot e^{-k_i x(\delta_i - x)}}{\lambda_{ci}} = 0, \quad 0 < x < \delta_i, \quad (4)$$

$$t_1(x_{0.1}) = t_{sL}, t_1(x_{\delta.1}) = \theta_{L.ВП}, t_2(x_{0.2}) = \theta_{R.ВП}, t_2(x_{\delta.2}) = t_{sR}, \quad (5)$$

$$\lambda_{c1} \cdot \frac{t_{sL} - \theta_{L.ВП}}{\delta_1} + (q1_{inL1} - q1_{inR1}) \cdot \frac{1 - e^{-k_1 \cdot \delta_1}}{k_1 \cdot \delta_1} = q_{ВП}, \quad (6)$$

$$q_{ВП} = \lambda_{c2} \cdot \frac{\theta_{R.ВП} - t_{sR}}{\delta_2} + (q2_{inL2} - q2_{inR2}) \cdot \frac{1 - e^{-k_2 \cdot \delta_2}}{k_2 \cdot \delta_2}. \quad (7)$$

Поток теплоты через воздушную прослойку стеклопакета можно рассчитать по следующей зависимости:

$$q_{ВП} = \alpha_{ВП} \cdot (\theta_{L.ВП} - \theta_{R.ВП}), \quad (8)$$

где  $\alpha_{ВП} = \alpha_{ВП}^L + \alpha_{ВП}^K$  – суммарный коэффициент теплоотдачи в воздушной прослойке;  $k_1, k_2$  – спектральный показатель поглощения,  $a_i, \phi_i, r_i$  – коэффициенты поглощения, пропускания, отражения  $i$ -стекла;  $q1_{inLi}, q1_{inRi}$  – плотность потока излучения, вошедшего в  $i$ -ое стекло с левой или правой стороны, Вт/м<sup>2</sup>;  $\lambda_{ci}$  – коэффициент теплопроводности  $i$ -го стекла, Вт/мК;  $\theta_{L.ВП}, \theta_{R.ВП}$  – температура левой или правой границы воздушной прослойки, °С;  $t_{ci}$  – температура поверхности стекла, °С.

Результаты тепловизионных измерений являлись исходными данными для разработанных математических моделей, а результаты контактных измерений использовались для их апробации (таблица).

Сравнение результатов расчетов по математическим моделям и контактных измерений

Наименование модели	Светопрозрачное ограждение – внешняя среда					Многослойная конструкция	
	$q_{Поток},$ Вт/м <sup>2</sup>	$q_{Модель},$ Вт/м <sup>2</sup>	$q^K,$ Вт/м <sup>2</sup>	$q^L,$ Вт/м <sup>2</sup>	$\delta q, \%$	$q_{Модель},$ Вт/м <sup>2</sup>	$\delta q, \%$
Эксперимент № 1	42,9	41,9	16,9	25	2,4	39,9	6,9
Эксперимент № 2	64,6	62,2	4,8	57,4	3,7	59	5,1

На основе предложенных математических моделей разработан расчетно-экспериментальный метод, позволяющий определить тепловые потери зданий через светопрозрачные ограждения по тепловизионным снимкам температурных полей наружных поверхностей. Метод учитывает реальную форму здания, оптические и терморadiационные свойства поверхностей теплообмена, условия наружной среды. Для объектов экспериментальных исследований расхождение между значениями плотности теплового потока, измеренной контактным способом и полученной расчетно-экспериментальным методом, не превышает 4 % при использовании математической модели «светопрозрачное ограждение – внешняя среда» и 7 % при использовании математической модели «многослойная конструкция».

#### Библиографический список

1. Горелов М.В. Разработка расчетно-экспериментального метода определения тепловых потерь через светопрозрачные ограждающие конструкции промышленных зданий с применением тепловизионной техники. Автореф. дис... к-та техн. наук. М.: НИУ «МЭИ», 2011. 20 с.